

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN PAVIMENTO UTILIZANDO UNA MEZCLA CON
ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO**



Presentado por:
Yulieth Adriana Avendaño Contreras
Ingeniera civil

Artículo presentado como requisito para obtener
El título de Especialista en Ingeniería de Pavimentos

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D. C.

2020

Technical evaluation of pavement using a mixture with asphalt modified with recycled rubber grain.

Evaluación técnica de un pavimento utilizando una mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado.

Yulieth Adriana Avendaño-Contreras ^a, & Juan Carlos Ruge-Cárdenas ^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. u6100380@unimilitar.edu.co

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. juan.ruge@unimilitar.edu.co

Abstract

In the world, Dense Hot Mixes (MDC) with asphalt modified with recycled rubber grain (GCR) are widely used in pavement engineering due to their technical and environmental aspects. However, there is no clear contribution in the design of flexible pavement structures. This work evaluated the application of a CDM with GCR for the design of a flexible pavement structure. In addition, the analysis was carried out with a typical pavement structure with an MDC 19 mixture. A sensitivity analysis of the design variables (subgrade, granular materials and thickness of the wearing course) was carried out. To analyze the influence of the asphalt mixtures, tests were carried out to determine the dynamic modulus (E^*) of the MDC-GCR mixture in order to determine the stiffness of the asphalt binder. Finally, the consumption of the pavement was determined in the face of fatigue cracking of the asphalt layer. The above in order to analyze the incidence of design variables in determining the thickness of the pavement layers. As a great conclusion, it is reported that pavement structures with MDC-GCR rubber grain present lower consumption by fatigue in reference to the control mixture MDC-19, the above is valid mainly for thicknesses of 7.5 cm. Additionally, the equivalent axes method overestimates the structural capacity of the pavement compared to the load spectrum. And finally the speed of movement of the vehicles influences the behavior since this is inversely proportional to the fatigue damage.

Keywords: modified asphalt, rubber grain, design of pavements, flexible pavements, speed, transit.

Resumen

En el mundo, las Mezclas Densas en Caliente (MDC) con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR) son ampliamente utilizado en la ingeniería de pavimentos por sus aspectos técnicos y ambientales. Sin embargo, no existe una contribución clara en el diseño de estructuras pavimento flexible. Este trabajo, evaluó la aplicación de una MDC con GCR para diseño de una estructura de pavimento flexible. Adicionalmente se realizó el análisis con una estructura típica de pavimento con una mezcla MDC 19. Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables de diseño (subrasante, materiales granulares y espesores de la capa de rodadura). Para analizar la influencia de las mezclas asfálticas, se realizaron ensayos para la determinación del módulo dinámico (E^*) de la mezcla MDC-GCR a fin de determinar la rigidez de la carpeta asfáltica. Finalmente se determinó el consumo de pavimento ante el agrietamiento por fatiga de la capa asfáltica. Lo anterior con el fin de analizar la incidencia de las variables de diseño en la determinación de los espesores de las capas del pavimento. Como gran conclusión se reporta que las estructuras de pavimento con grano de caucho MDC-GCR presentan menores consumos por fatiga en referencia a la mezcla de control MDC-19, lo anterior es válido principalmente para espesores de 7.5 cm. Adicionalmente el método de los ejes equivalentes sobreestima la capacidad estructural del pavimento en comparación al espectro de cargas. Y finalmente la velocidad de circulación de los vehículos influye en el comportamiento ya que esta es inversamente proporcional a los daños por fatiga.

Palabras clave: asfalto modificado, grano de caucho; diseño de pavimentos, pavimentos flexibles, velocidad, tránsito.

1 Introducción

El desarrollo social y económico de una nación está directamente articulada con los modos diversos de transporte. En este sentido, el desarrollo de obras de infraestructura vial

relacionadas con la ingeniería de pavimentos es fundamental para el crecimiento económico y la competitividad de una nación. En Colombia, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) tiene a cargo aproximadamente 11.317 km de carreteras entre pavimentadas y no pavimentadas. De la red vial pavimentada, aproximadamente

el 52.6% se encuentran en estado muy bueno a bueno, el 28.9% en estado regular y 18.5% en estado malo a muy malo [1]. En este sentido, se hacen necesarios estudios técnicos que abarquen la utilización de nuevas técnicas y tecnologías con el fin de contribuir al mejoramiento y la preservación de la red vial.

Una de las técnicas más comunes para la construcción y mejoramiento de pavimentos flexibles, es la utilización de mezclas asfálticas con incorporación de asfaltos modificados con Grano de Caucho Reciclado (GCR). Según diversos investigadores, la utilización del asfalto modificado con GCR en las mezclas asfálticas proporciona mayor desempeño en el comportamiento mecánico del pavimento frente a los materiales asfálticos convencionales. Lo anterior, contribuye a una mayor durabilidad, lo cual permite reducir las intervenciones y los costos asociados al mantenimiento vial.

En la década de los años 60 se desarrollaron los primeros intentos de la creación del asfalto modificado con GCR por el ingeniero Charles McDonal's [2] [3]. Lo anterior, con el fin de dar solución a la disposición final de neumáticos usados y contribuir a la preservación y conservación del medio ambiente en términos de disposición final de residuos sólidos [4] [5] [6]. Actualmente, existen cuatro generaciones de incorporación del GCR en las mezclas asfálticas [7][8][9]. La primera generación es conocida como la vía seca, donde las partículas GCR sustituyen a los agregados finos (tamaño menor entre 0.4 a 10 mm) [10]. El principal problema de la vía seca hace referencia al proceso de compactación, dado el poco tiempo de contacto entre los agregados y GCR con asfalto [11]. Sin embargo, algunos estudios buscan aumentar el tiempo de contacto entre los materiales y reducir el tamaño del GCR con el fin de mejorar el proceso de compactación en campo [10][12][13][14]. La segunda generación también es conocida como vía húmeda, donde los materiales (GCR de tamaño menor a 2.36 mm y asfalto) son mezclados a elevadas temperaturas (generalmente superiores a 160 °C) por un tiempo entre 45 a 60 minutos [15][16][17][18]. Según la especificación ASTM D6114, la cantidad mínima en masa de GCR es del 15%. En este proceso, ocurren procesos físico-químicos entre el asfalto original y el material modificador (partículas de GCR), originando mayor consistencia del asfalto [19]. Adicionalmente, existen variaciones en las características reológicas, las cuales proporcionan una mayor rigidez, reduciendo el fenómeno de la deformación permanente y aumentando la vida fatiga del asfalto modificado [20][21]. Los principales problemas asociados a la vía húmeda hacen referencia a cambios físico-químicos originados en asfalto, debidos a las altas temperaturas y tiempos de calentamiento durante la modificación [22][23][24]. Ante ello, surgió la tercera generación de asfalto caucho, que contempla la utilización de aditivos reductores de viscosidad. Lo anterior permite disminuir las temperaturas de fabricación y compactación de la mezcla. Sin embargo, las utilizaciones de dichos aditivos reducen el desempeño físico-mecánico de la mezcla en campo. Finalmente, la cuarta generación es una técnica que permite

la incorporación de GCR por la vía húmeda y seca. Adicionalmente, se incorpora un llenante mineral que permite reducir las temperaturas de fabricación y compactación de la mezcla [8] [9].

De forma general, la utilización del asfalto modificado con GCR permite a mejorar aspectos técnicos y funcionales del pavimento [25]. En los aspectos técnicos, al incorporar asfalto modificado con GCR en la mezcla asfáltica, se incrementa la resistencia a la fatiga y al envejecimiento, así como también reduce la deformación permanente [26] [9] [27] [28] [29]. Lo anterior, dado que la presencia del GCR contribuye a una mayor recuperación elástica del asfalto y consecuentemente de la mezcla asfáltica. En este sentido, la resistencia a la fatiga en la mezcla aumenta, dado que ante la acción de carga dinámica la mezcla proporciona una mayor recuperación elástica y consecuentemente un mayor número de ciclos de carga [30].

En el aspecto ambiental, la utilización de GCR como material modificador del asfalto se considera una forma de disposición final y ambientalmente correcta de las grandes cantidades de neumáticos usados. Sin embargo, a pesar de los múltiples beneficios del asfalto modificado con GCR en las mezclas asfálticas, basados en la literatura consultada a la fecha, solamente fueron encontrados estudios técnicos que contemplaron el estudio de los asfaltos y las mezclas asfálticas con GCR. Sin embargo, en la literatura técnica consultada en Colombia no existe una clara contribución referente al diseño de espesores de estructuras de pavimentos y sus costos de construcción y de manteniendo durante el periodo de diseño. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño de un pavimento flexible incorporando una mezcla de concreto asfáltico con asfalto modificado con GCR (MDC-GCR). Adicionalmente, se comparó con el desempeño de pavimento utilizando una mezcla asfáltica convencional MDC-19, por ser la más utilizada para obras de pavimentos en Colombia. Para tal fin, se realizaron análisis de estructuras de pavimentos contemplando la utilización de cinco suelos finos de subrasante. A partir de la caracterización de cada suelo de subrasante, fueron definidos los módulos de los materiales de las capas granulares de subbase y base, con espesores de 30 cm y 20 cm, respectivamente. Para la capa de rodadura, se contemplaron espesores de 7.5, 10 y 15 cm utilizando mezclas MDC-GCR y MDC-19. Fueron realizados ensayos de laboratorio con el fin de determinar el módulo dinámico de cada mezcla a diferentes temperaturas y frecuencias de carga y la resistencia a la fatiga. Los análisis de las estructuras de los pavimentos se realizaron contemplando la incidencia de la velocidad de circulación de los vehículos. Es decir, se realizaron análisis contemplando velocidades de 50, 80 y 110 km/h. Adicionalmente, fueron realizados análisis contemplando el método de los ejes equivalentes y el espectro de carga. Lo anterior, con fin de proporcionar una condición global del pavimento con la utilización de mezclas con asfalto modificado con GCR.

2 Metodología

Inicialmente, se describirá las variables relacionadas con el diseño de dos estructuras de pavimento flexible, considerando la utilización de las mezclas asfálticas tipo MDC-GCR y MDC-19 (mezcla de control). Seguidamente se presentan la metodología experimental de laboratorio para la determinación de los modelos de deterioros utilizados para la predicción del comportamiento y cálculo de consumos por fatiga para la capa de asfáltica. Finalmente, se seleccionaron dos estructuras de pavimento utilizando MDC-GCR y MDC-19, respectivamente. A partir del análisis estructural de dichas estructuras, se realizó una evaluación técnica y económica durante la vida útil de los pavimentos, por medio del software Highway Design and Maintenance (HDM-4).

2.1 Materiales

2.1.1 Mezclas de concreto asfáltico

Se realizaron ensayos de laboratorio para la evaluación del desempeño mecánico de las mezclas asfálticas. Para tal fin, se utilizó un asfalto modificado con GCR tipo II y un asfalto tipo 60-70 (clasificación por penetración). Los asfaltos, cumplen los requisitos contemplados en los Artículos 410 y 413 del INVIAS 2013, respectivamente. Los agregados pétreos son utilizados de la ciudad de Bogotá (Colombia). Los agregados cumplen con las especificaciones del Artículo 450 del INVIAS 2013 [32]. El diseño de la mezcla de concreto asfáltico se realizó con la metodología tipo Marshall. Para el caso de la granulometría, se modificó la granulometría original de los agregados y se trabajó con el límite promedio de la especificación de la mezcla asfáltica MDC-19 contemplada en el Artículo 450 del INVIAS 2013 [32]. Los contenidos óptimos de asfalto corresponden a 5.3% para y 6.5% para las mezclas.

2.1.1.1 Módulo dinámico

Para la determinación de la rigidez de las mezclas asfálticas (MDC-GCR y MDC-19) fueron realizados ensayos de laboratorio con el fin de determinar el módulo dinámico (E^*) de según los protocolos de la ASTM D 3497. Detalles de la realización del ensayo pueden consultarse en [31]. Los ensayos se realizaron en una máquina universal UTM a frecuencias de carga de 1, 4, 10 16 Hz y temperaturas de 5, 15, 20, 25 y 40 °C. Para cada tipo mezcla asfáltica fueron realizadas cuatro probetas y se promediaron los resultados de E^* para las frecuencias y temperaturas analizadas. La presentación de los resultados del módulo dinámico se realizó por medio de la construcción de las curvas maestras para cada mezcla. Para tal fin, fue utilizado el modelo sigmoidal incorporado en mechanistic-empirical design guide MEPDG of the AASTHO, conforme se presenta en la Eq. 1.

$$\text{Log} |E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \text{Log}(f_r)}} \quad (1)$$

En la Eq. 6, E^* corresponde al módulo dinámico de la mezcla en MPa. Los coeficientes del modelo δ , Max, β y γ corresponde a las constantes obtenidas por regresión para cada material. f_r , corresponde a la frecuencia de referencia en Hz. Para la construcción de la curva maestra se consideró una temperatura de referencia de 20°C.

A partir de las curvas maestras se obtuvo el E^* de las mezclas asfálticas. Para tal fin, se determinó la frecuencia de carga producida por la velocidad de circulación de los vehículos mediante las Eq. 2-3. Fueron analizadas velocidades de circulación de vehículos de 50, 80 y 100 km/h, a fin de analizar su influencia en el desempeño del pavimento.

$$f = \frac{1}{2\pi t_c} \quad (2)$$

$$t_c = \frac{L}{V} 10^{0.004h} \quad (3)$$

Donde f , es la frecuencia de carga en Hz; t_c es el tiempo de aplicación de carga en segundos; L es la longitud de contacto de la llanta con la superficie del pavimento (30 cm); V corresponde a la velocidad de operación de los vehículos en cm/s, h es el espesor desde la superficie del pavimento al centro de la capa asfáltica. En este estudio se consideraron espesores de la capa asfáltica de 7.5, 10 y 15 cm. Consecuentemente $h=3.75, 5.0$ y 7.5 cm, respectivamente.

2.1.1.2 Resistencia a la Fatiga

Para la determinación de la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas (MDC-GCR y MDC-19) fueron realizados ensayos de laboratorio a deformación controlada, con el fin de determinar el número de ciclos de falla de según los protocolos de la UNE-EN 12697-24. Detalles de la realización del ensayo pueden consultarse en [31]. Los ensayos se realizaron en un banco de fatiga francés a frecuencia de carga de 10 Hz, temperatura de 25 °C y a tres niveles de deformación. Para cada tipo mezcla asfáltica fueron realizadas 12 probetas, es decir cuatro repeticiones para cada nivel de deformación. Como resultados se reporta las curvas de variación del nivel de deformación con el número de ciclos para la falla para cada mezcla. A partir de las curvas de fatiga de cada mezcla, fue obtenido el modelo para la predicción de comportamiento, considerando un factor de transferencia (campo-laboratorio) de 10, basado en la literatura existente.

2.1.2 Subrasante y materiales granulares

Los análisis de las estructuras de los pavimentos fueron realizados contemplando cinco tipos de suelos finos. Se consideraron valores California Bearing Ratio (CBR) del 2, 4, 6, 8 y 10%, respectivamente. La caracterización de la subrasante se realizó por su módulo resiliente (E_{subr}). Este parámetro fue obtenido a partir del valor del CBR mediante el promedio de las Eq. 4-6, donde el CBR se expresa en % y el E_{subr} en psi.

$$E_{subr} = 2555 \cdot CBR^{0.64} \quad (4)$$

$$E_{subr} = 1500 \cdot CBR \quad (5)$$

$$E_{subr} = 3000 \cdot CBR^{0.65} \quad (6)$$

A partir de la caracterización de la subrasante, se determinó el módulo resiliente en MPa de las capas granulares de base y subbase, respectivamente mediante las Eq. 7-8, respectivamente. Para tal fin, fueron adoptados unos espesores (h) constantes de subbase y base de 30 y 20 cm, respectivamente.

$$E_{subb} = E_{subr} \left[\frac{5.35 \cdot \log(h_{subb}) + 0.621 \cdot \log(E_{subr})}{-(1.56 \cdot \log(E_{subr}) \cdot \log(h_{subb})) - 1.13} \right] \quad (7)$$

$$E_{base} = E_{subb} \left[\frac{8.05 \cdot \log(h_{base}) + 0.84 \cdot \log(E_{subb})}{-(2.1 \cdot \log(E_{base}) \cdot \log(h_{base})) - 2.21} \right] \quad (8)$$

Donde, E_{subr} , E_{subb} y E_{base} corresponden a los módulos resilientes en MPa de la subrasante y de las capas de subbase y base, respectivamente. h_{sub} y h_{base} son los espesores de las capas de subbase y base en cm.

2.1.3 Tránsito

El tránsito se considerando el método de los ejes equivalentes (N) y el espectro de carga. Para tal fin, fueron analizados las categorías y composiciones del tránsito reportados por el Instituto Nacional de Vías de Colombia (Ver Tabla 1). Los vehículos de diseño con sus respectivos ejes con sus cargas máximas se presentan en la Fig 1. Para este estudio se consideraron las máximas cargas legales por eje. Adicionalmente, en la categoría de vehículos C3-C4, fueron considerados los vehículos Camión C3, Tracto Camión C3 y Tracto Camión C4. A partir de las informaciones de la Tabla 1 se determinó el número de ejes equivalentes (N) considerando un Eje Simple de Rueda Doble (ESRD) estándar de 8.2 toneladas. Para cada vehículo de diseño se procedió a determinar el Factor de Equivalencia de Carga (FEC), a partir de la Carga (C), en toneladas de cada eje. Las Eq. 9-12 permiten determinar el FEC para un Eje Simple Rueda Simple (ESRS), un doble (ESRD), Eje Tandem y Tridem, respectivamente. Lo anterior, con el fin de determinar el Factor de Daño Vehicular (FDV) (Ver Eq. 13) para cada vehículo.

Table 1. Categorías y composiciones del tránsito.

Categoría	TPD	Autos	Buses	Camiones					
				C2P	C2G	C3-C4	C5	C6	
1	0 a 500	58.2	8.1	13.2	13.2	5.9	0.8	0.6	
2	500 a 1000	67.1	8.1	10.2	9.9	2.9	0.5	1.3	
3	1000 a 2500	64.6	7.6	8.8	10	3.5	1.4	4.1	
4	2500 a 5000	60.5	8.8	9.0	9.3	3.4	2.3	6.7	
5	5000 a 10000	61.2	9.9	8.1	8.8	3.7	2.2		

6	10000 a 20000	64.2	10.9	7.2	7.6	3.0	2.0	5.1
7	>20000	69.9	10.6	6.2	6.4	2.7	1.5	2.7

Source: A partir de informaciones de INVIAS.

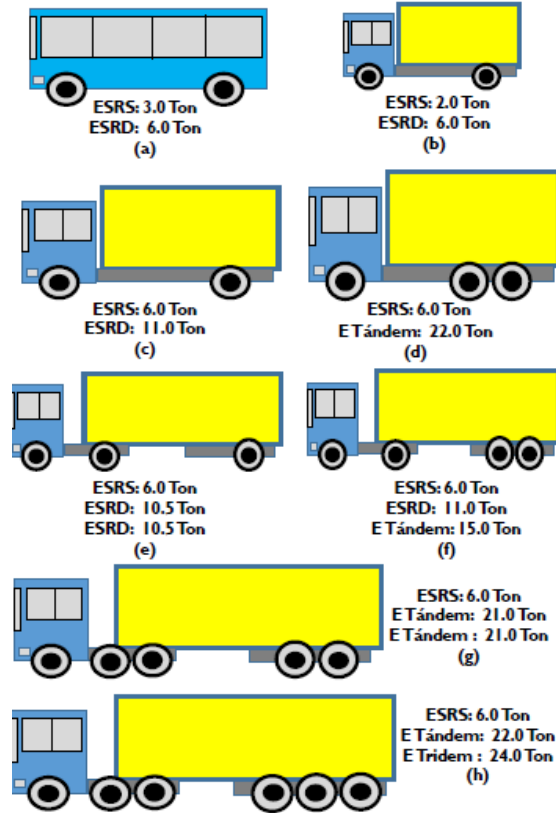


Fig 1. Vehículos de diseño: (a) Bus; (b) Camión C2P; (c) Camión C2G; (d) Camión C3; (e) Tracto Camión C3; (f) Tracto Camión C4; (g) Tracto Camión C5; (h) Tracto Camión C6.

Source: The authors.

$$FEC_{ESRS} = \left[\frac{C}{6.6} \right]^4 \quad (9)$$

$$FEC_{ESRD} = \left[\frac{C}{8.2} \right]^4 \quad (10)$$

$$FEC_{E-Tándem} = \left[\frac{C}{15.0} \right]^4 \quad (11)$$

$$FEC_{E-Tridem} = \left[\frac{C}{23.0} \right]^4 \quad (12)$$

$$FDV = \sum FEC \quad (13)$$

La proyección del tránsito para cada categoría se realizó considerando Tránsito Promedio Diario (TPD) de los vehículos. Para tal fin, fueron utilizados el método exponencial y lineal mediante las Eq. 14-15, respectivamente. Donde, N es el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril durante el periodo de diseño, N_0 se define como el número de ejes

equivalentes en el primer año, r es la tasa del crecimiento del tránsito (4%), n es el número de años del periodo de diseño (10 años), FD es el Factor de distribución direccional y FC es el factor de distribución para el carril de diseño. En este estudio se asumió una vía de dos carriles en dos sentidos. Por lo tanto, $FD=0.5$ y $FC=1.0$.

$$N = N_o \cdot \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] \cdot FD \cdot FC \quad (14)$$

$$N = \frac{n}{2} \cdot [2N_o + (n-1) \cdot (N_o \cdot r)] \cdot FD \cdot FC \quad (15)$$

Finalmente, con las informaciones obtenidas en los análisis de las categorías (TDP, composición del tránsito y vehículos), fue proyectado el espectro de carga para una única categoría. Para tal fin, fueron considerados las cargas máximas por ejes de los vehículos presentados en la Figura 3. Las proyecciones del tránsito, se realizaron con los métodos.

2.2 Evaluación estructural

Para la evaluación estructural del pavimento se realizaron modelaciones de estructuras considerando: dos tipos de mezclas asfálticas (MDC-GCR y MDC-19) y cinco tipos de subrasante, un tipo de material granular (subbase y base). Los análisis estructurales se realizaron considerando la acción del tránsito por medio de los ejes equivalente y el espectro de carga. Los espesores de los materiales granulares de subbase y base corresponden a 30 y 20 cm, respectivamente. Para el caso de la capa de rodadura, fueron evaluados los espesores de las mezclas asfálticas de 7.5, 10 y 15 cm. Adicionalmente, para evaluar el desempeño los materiales asfáltico, fueron evaluadas velocidades de circulación de los vehículos 50, 80 y 110 km/hora. En total fueron simuladas 90 estructuras de pavimentos flexibles. Para cada estructura se realizó el análisis estructural con el software PITRAPAVE desarrollado por la Universidad de Costa Rica, a fin de determinar la deformación a tracción en la fibra inferior de la capa de rodadura. A partir de dichos resultados, se realizó la predicción del comportamiento del material ante el fenómeno de fatiga.

Finalmente, para cada estructura se determinó el daño o consumos por fatiga (Ver Eq. 16). En cada estructura se utilizó la información del análisis estructural, considerando la influencia del método de los ejes equivalentes y el espectro de carga, respectivamente.

$$C_{Fatiga} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{N}{N_{Adm-F}} \quad (16)$$

Donde, C_{Fatiga} es el consumo por fatiga. N corresponde al número de repeticiones de cargas esperadas de tránsito. N_{Adm-F}

es el número de repeticiones admisibles para causar el agrietamiento de la capa asfáltica.

3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados referentes a las variables de diseño de los pavimentos tales como: caracterización de materiales (mezclas asfálticas, materiales granulares y subrasante) y tránsito. Seguidamente se presentan los resultados de consumos o daños por fatiga a partir de los análisis estructurales realizados a cada estructura de pavimento. Finalmente se presentan los resultados referentes a la evaluación técnica de las estructuras analizadas.

3.1 Caracterización de materiales

En esta sección se presentan los resultados para la determinación de la rigidez de los materiales de las estructuras de pavimentos analizadas. En principio se presentan los resultados de laboratorio del módulo dinámico y de la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas MDC-GCR y MDC-19. Posteriormente se presentan los módulos resilientes de la subrasante y las capas granulares, obtenidas por correlaciones.

En la Fig. 2 y Tabla 2 se presentan los resultados de las curvas maestras para las mezclas MDC-GCR y MDC-19. A partir de los resultados obtenidos, es posible evidenciar que existe una reducción de aproximadamente 25% en el módulo dinámico de la mezcla MDC-GCR en referencia a la mezcla MDC-19. Dicha reducción se presenta para todo el rango de frecuencia evaluado. La reducción de la rigidez (módulo dinámico) de la mezcla MDC-GCR es atribuido a la presencia del grano de caucho reciclado en la matriz del asfalto. En este sentido, durante la sollicitación de carga, la mezcla asfáltica con GCR tiende a presentar mayor deformabilidad, consecuentemente se presenta una reducción del módulo dinámico en comparación a la mezcla de control.

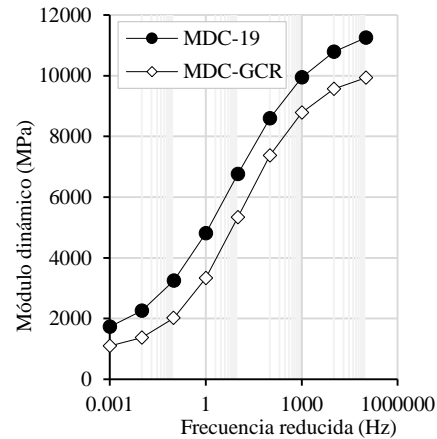


Fig 2. Curvas maestras de las mezclas asfálticas.
Source: The authors.

Table 2. Constantes del modelo sigmosoidal para las curvas maestras

Mezcla	Delta δ	Máx	Beta β	Gamma γ
MDC-19	3.08	4.07	-0.44	-0.70
MDC-GCR	2.95	4.01	-0.16	-0.85

Source: The authors.

En la Fig. 3 y Tabla 3 se presentan los resultados del ensayo de fatiga para las mezclas MDC-GCR y MDC-19. A partir de los resultados obtenidos, la mezcla MDC-GCR presentó un aumento de la resistencia a la fatiga en comparación a la mezcla MDC-19, lo cual es evidenciado por el incremento de la deformación ϵ_6 . Este comportamiento se presenta a pesar de la reducción de la rigidez de la mezcla MDC-GCR en referencia a la mezcla de control. Lo anterior, es atribuido a la mayor recuperación elástica que presenta la mezcla con GCR durante el periodo de descarga en el ensayo, lo cual se traduce en un mayor número de ciclos de carga en referencia a la mezcla de control.

Table 3. Modelos de fatiga de las mezclas asfálticas.

Mezcla	Modelo	ϵ_6
MDC-19	$\epsilon = 0.0023 \cdot N^{-0.206}$	1.34E-04
MDC-GCR	$\epsilon = 0.0058 \cdot N^{-0.265}$	1.49E-04

Source: The authors.

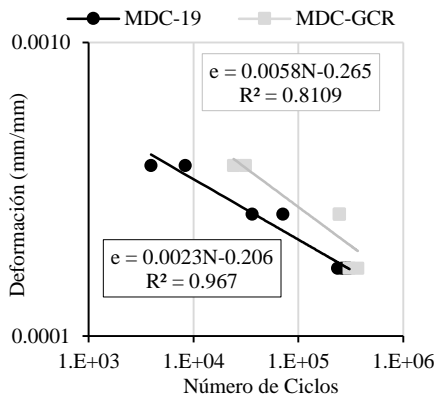


Fig 3. Curvas de fatiga a deformación controlada.
Source: The authors.

En la Fig. 4 se puede evidenciar los resultados del módulo resiliente (E_{subr}) para los cinco tipos de subrasante adoptados. Dichos resultados fueron obtenidos a partir de correlaciones con el CBR. De forma lógica, a partir de los resultados se puede evidenciar que el E_{subr} aumenta con los incrementos del CBR, lo cual proporciona mayor capacidad de soporte de la subrasante del pavimento. Adicionalmente, en la Tabla 4 se presentan los módulos resilientes los materiales granulares a partir de cada subrasante analizada.

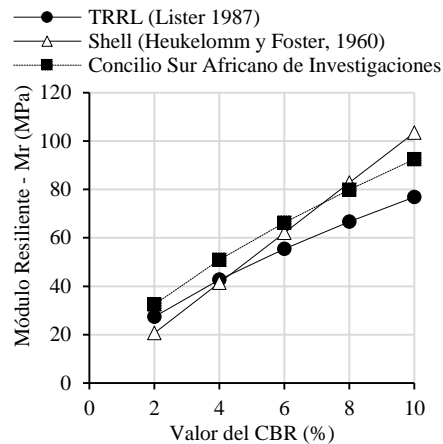


Fig 4. Evolución del Esub con el valor del CBR.
Source: The authors.

Table 4. Módulos resilientes de subrasante, subbase y base en MPa.

Capa	CBR de la subrasante (%)				
	2	4	6	8	10
Subrasante	27	45	61	76	91
Sub-Base	117	180	231	275	316
Base	510	718	874	1004	1116

Source: The authors.

3.2 Caracterización del tránsito

En la Tabla 5 se presentan los cálculos de los ejes equivalentes por el método exponencial y lineal para las categorías del tránsito, considerando el TPD promedio de cada categoría (Ver Tabla 1).

Table 5. Proyección del tránsito.

Categoría	TPD	N (Exponencial)	N (Lineal)
1	500	1.06E+06	1.05E+06
2	750	1.60E+06	1.58E+06
3	1750	3.72E+06	3.69E+06
4	3750	9.67E+06	9.57E+06
5	7500	2.49E+07	2.46E+07
6	15000	4.21E+07	4.17E+07
7	20000	4.37E+07	4.33E+07

Source: The authors.

A partir de los resultados obtenidos y de acuerdo a la clasificación de tránsito del INIVAS, es posible evidenciar que las categorías 1-3 y 4-7 corresponden a intermedios y altos volúmenes de tránsito, respectivamente. En este estudio se consideraron únicamente los valores de tránsito de la categoría 4. Lo anterior, por representar un volumen de tránsito alto de 9.67 millones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas por carril durante el periodo de diseño. No se consideraron las categorías 5-7, dado que los volúmenes de tránsito reportados son extremadamente altos y no representativos en la red vial colombiana. En la Figura 5 se presenta el espectro de carga utilizado para los análisis de las estructuras de pavimentos, los cuales fueron obtenidos de las cargas máximas de los ejes de los vehículos de diseño.

Table 5. Espectro de cargas.

Tipo de Eje	Carga (ton)	TPD	N (Exponencial)	N (Lineal)
ESRS	2.0	338	7.06E+05	6.99E+05
ESRS	3.0	330	6.90E+05	6.84E+05
ESRS	6.0	814	1.70E+06	1.69E+06
ESRD	6.0	668	1.40E+06	1.38E+06
ESRD	10.5	85	1.79E+05	1.77E+05
ESRD	11.0	391	8.19E+05	8.11E+05
Tándem	15.0	43	8.93E+04	8.84E+04
Tándem	21.0	173	3.61E+05	3.57E+05
Tándem	22.0	294	6.15E+05	6.09E+05
Tridem	24.0	251	5.26E+05	5.20E+05

Source: The authors.

3.3 Análisis de deformación a tracción

En la Fig 5 se presentan los resultados obtenidos de la deformación a tracción en la fibra inferior de la capa de rodadura de la capa asfáltica, considerando la influencia de un eje simple de rueda doble de 8.2 toneladas sobre las estructuras de pavimentos con las mezclas asfálticas (MDC-GCR y MDC-19). En análisis se consideró la influencia de las

velocidades de operación de 50, 80 y 100 km/hora, respectivamente. A partir de los resultados obtenidos, es posible evidenciar que las estructuras de pavimentos con la mezcla MDC-GCR presentaron mayores valores de deformación a tracción en referencia a la mezcla de control. Ese comportamiento fue presentado para cada espesor, velocidad de circulación y subrasante analizado. De manera coherente, lo anterior es atribuido a la reducción del módulo dinámico de la mezcla, conforme fue evidenciado por medio de las curvas maestras. Por otra parte, se puede analizar que: i) la deformación de tracción para los dos tipos de mezcla disminuye en función del aumento del CBR, lo cual es atribuido al aporte estructural de los materiales granulares de base y subbase. Es decir, el aumento de la capacidad estructural de la plataforma del pavimento (materiales granulares), origina una menor capacidad de deformación de la capa asfáltica. ii) la deformación a tracción disminuye en función del espesor de la capa de rodadura. Es decir, pavimentos con capas de rodadura de 15 cm de espesor tienden a presentar menores deformaciones a tracción en referencia a los pavimentos con capas rodadura con espesores de 10 y 7.5 cm. Dichos comportamientos se presentan independientemente de la velocidad de circulación de los vehículos.

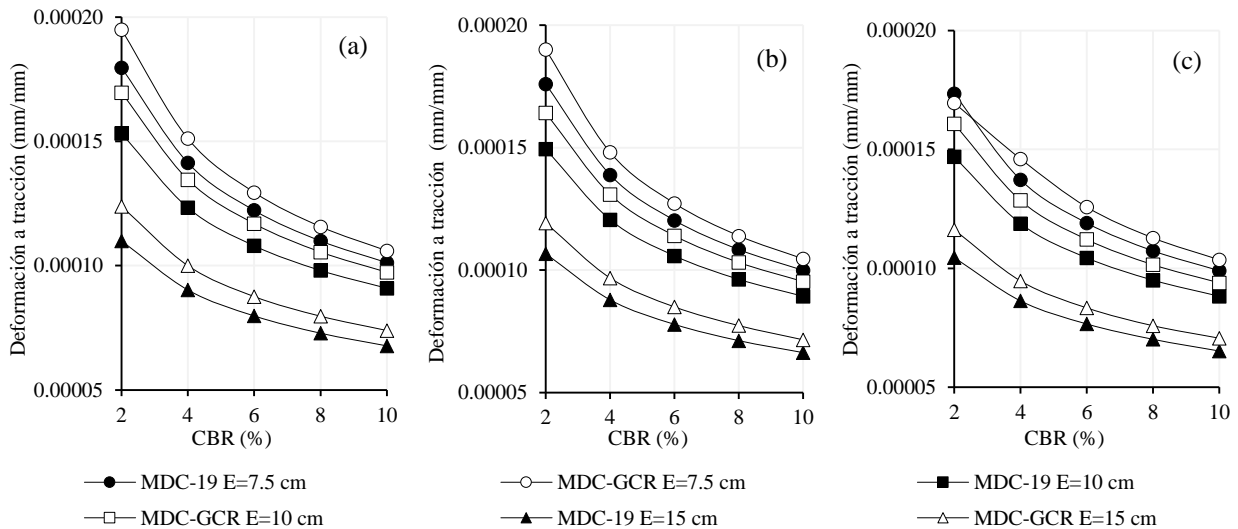


Fig 5. Evolución de la deformación a tracción con el CBR a velocidad de circulación: a) 50 km/hora, b) 80 km/hora, c) 110 km/hora.

Source: The authors.

A partir de los anteriores resultados, fue posible realizar una correlación, con el fin de determinar la deformación a tracción a partir del valor de CBR de la subrasante y del espesor de la capa de rodadura. En principio, fue definido la variable k , la cual asocia el valor del CBR con el espesor de la capa asfáltica- e , conforme se presenta en la Eq 17.

$$K = \frac{1}{CBR \cdot e} \quad (17)$$

En la Fig. 6 se presenta una tendencia clara que relaciona la variable k con la deformación a tracción que se produce en

la fibra inferior de la capa de rodadura, para los pavimentos con mezclas tipo MDC-GCR y MDC-19, respectivamente. De esta forma, a partir de los modelos de correlación presentados en la Tabla 6 es posible obtener de forma rápida la deformación a tracción en la capa de rodadura del pavimento a partir del CBR y el espesor de capa asfáltica. Las ecuaciones son válidas para pavimentos con: i) 20 y 30 cm de base y subbase granular, respectivamente. ii) subrasantes con CBR comprendidos entre 2 y 10%. iii) capas asfálticas con espesores comprendidos entre 7.5 y 15 cm, iv) influencia de un eje estándar de rueda doble de 8.2 toneladas.

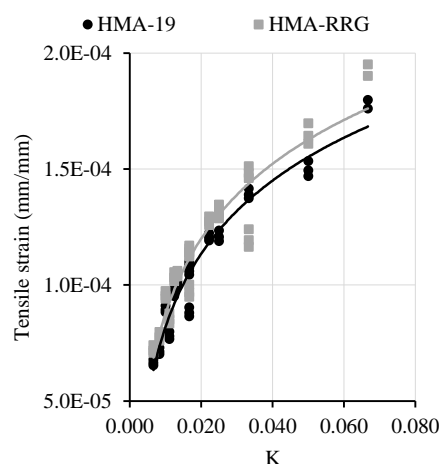


Fig 6. Evolución de la deformación a tracción con K.

Source: The authors.

Table 6. Modelos de fatiga de las mezclas asfálticas.

Mezcla	Modelo	R2
MDC-19	$\varepsilon_t = 0.0000456 \cdot \ln(K) + 0.002917$	0.94
MDC-GCR	$\varepsilon_t = 0.0000466 \cdot \ln(K) + 0.003023$	0.91

Source: The authors.

3.5 Consumos por fatiga

En la Fig 7 se presentan los resultados obtenidos de la deformación a tracción en la fibra inferior de la capa de rodadura de las estructuras de pavimentos con las mezclas MDC-GCR y MDC-19, utilizando espesores de 7.5, 10 y 15 cm, respectivamente. Fueron consideradas las velocidades de circulación de los vehículos de 50, 80 y 110 km/hora. Adicionalmente, se realizaron análisis considerando la influencia del tránsito por medio de los ejes equivalentes y el espectro de carga. A partir de los resultados obtenidos, se puede evidenciar de forma obvia, que los consumos por fatiga disminuyeron al aumentar los espesores de la capa asfáltica. Este comportamiento es evidenciado independientemente del tipo de mezcla asfáltica utiliza. Adicionalmente, los mayores consumos de daño por fatiga se presentaron en las estructuras que tienen subrasantes con bajos valores de CBR (2 y 4%). Lo anterior es atribuido a la baja capacidad estructural de los materiales granulares y de subrasante que soportan la capa de rodadura. Por lo anterior, en pavimentos con subrasantes blandas (CBR inferior al 5%), independiente del

tipo de mezcla asfáltica utilizada, se recomienda realizar estabilización o mejoramiento de suelos con el fin de disminuir los consumos por fatiga y optimizar los espesores del pavimento.

Por otra parte, se puede evidenciar que el uso de la MDC-GCR en las estructuras de pavimentos origina una reducción del consumo o daño por fatiga en referencia a los pavimentos con la mezcla asfáltica de control. Esos resultados fueron más evidentes para las estructuras de pavimentos con 7.5 cm de espesor de la capa de rodadura, excepto para las estructuras con CBR de 10%. Lo anterior es atribuido al aumento de la resistencia a la fatiga de la mezcla MDC-GCR en referencia a la mezcla de control, lo cual origina una mayor capacidad en el número de repeticiones de carga y consecuentemente se presenta una reducción del daño por fatiga. Para los pavimentos analizados con 10 y 15 cm de espesor de capa asfáltica MDC-GCR, presentaron un leve aumento de los consumos por fatiga en referencia los pavimentos con la mezcla de control. Dichos comportamientos fueron evidenciados para los análisis considerando la influencia de los ejes equivalentes y el espectro de carga.

Los análisis realizados permiten demostrar que independientemente de las variables analizadas (tipo de mezcla asfáltica, velocidad de circulación y suelo de subrasante), los consumos obtenidos a partir del método de los ejes equivalentes son superiores en referencia a los determinados por medio de los espectros de carga. De esta forma, los diseños de pavimentos con los métodos de los ejes equivalentes sobreestiman la capacidad estructural del pavimento, pudiendo incrementar los espesores de las capas de pavimentos y consecuentemente elevar los costos económicos en las obras. En este sentido, siguiendo las recomendaciones de la literatura, es necesario realizar los análisis estructurales del pavimento considerando los espectros de cargas, con el fin de realizar análisis asertivo de la condición real de mismo.

En referencia a la velocidad circulación de los vehículos sobre el pavimento, es posible afirmar que al reducir la velocidad de 80 a 50 km/hora se genera un incremento del consumo por fatiga en aproximadamente el 10%. En sentido contrario, al aumentar la velocidad de 80 a 110 km/hora se presenta una reducción del consumo por fatiga en aproximadamente el 7%. Estos comportamientos se presentaron para los pavimentos, considerando los dos tipos de mezclas asfálticas (MDC-GCR y MDC-19) y para los análisis considerando el método de los ejes equivalentes y el espectro de carga.

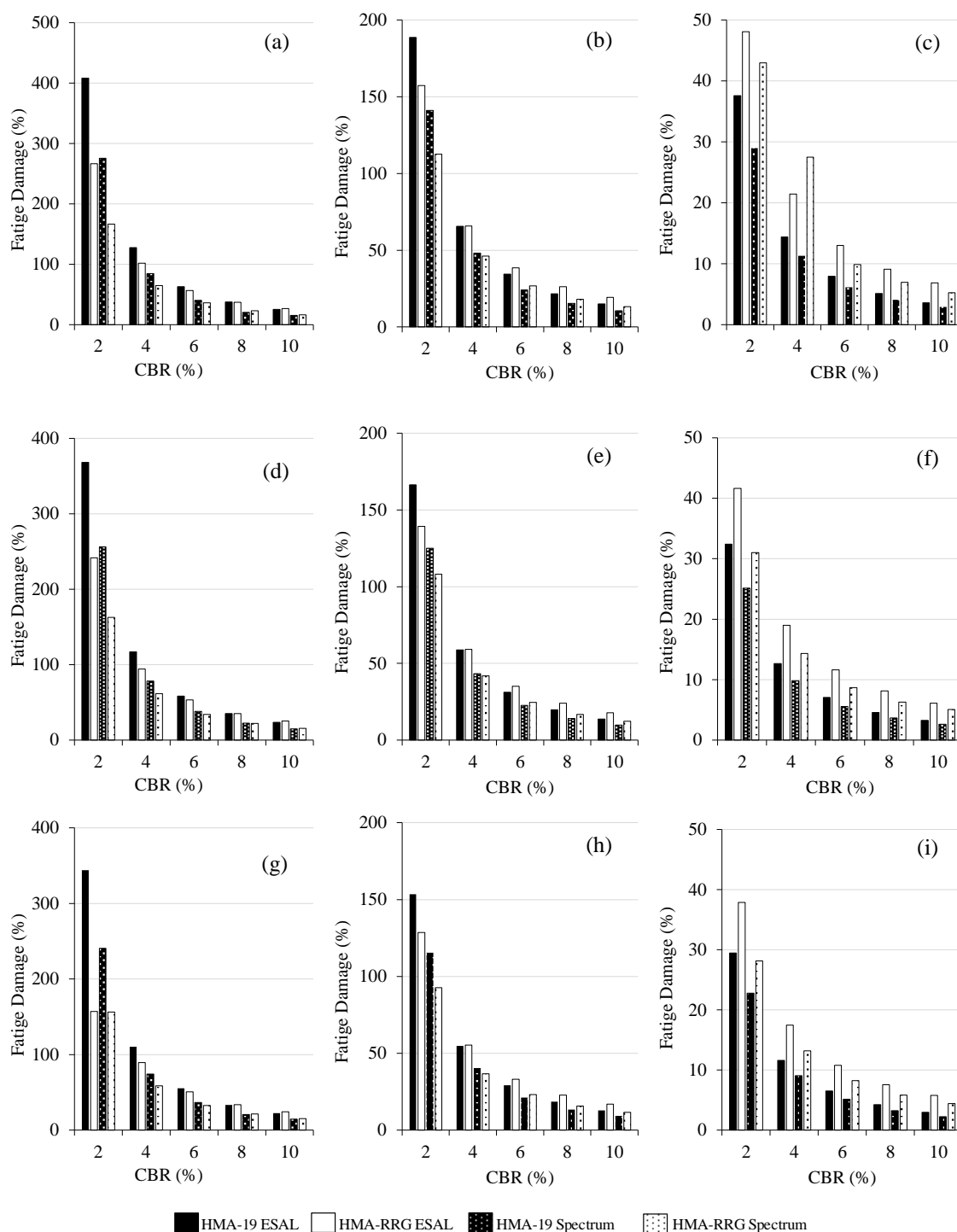


Fig 7. Consumos por fatiga: a) V=50 km/hora, e=7.5 cm, b) V=50 km/hora, e=10 cm, c) V=50 km/hora, e=15 cm, d) V=80 km/hora, e=7.5 cm, e) V=80 km/hora, e=10 cm, f) V=80 km/hora, e=15 cm, g) V=110 km/hora, e=7.5 cm, h) V=110 km/hora, e=10 cm, i) V=110 km/hora, e=15 cm.
Source: The authors.

4. Conclusiones

El principal objetivo del presente estudio consistió en evaluar el desempeño de un pavimento flexible incorporando una mezcla con asfalto modificado con GCR (MDC-GCR) y una mezcla asfáltica convencional. Para tal fin, fueron

realizados ensayos de laboratorio con el objetivo de determinar parámetros de rigidez y resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas. También fueron considerados cinco tipos de subrasante con el fin de analizar la capacidad de soporte de la estructura. Adicionalmente, se contemplaron espesores de la capa de rodadura 7.5, 10 y 15 cm para cada tipo de

mezcla. Asimismo, se examinó la influencia de la velocidad de operación vehicular de (50, 80 y 110 km/hora). Los análisis fueron realizados considerando el método de los ejes equivalentes y el espectro de carga. A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que:

Luego de evaluar el comportamiento de las mezclas de control, MDC-19 y una mezcla MDC-GCR respectivamente, se puede evidenciar que el uso de una mezcla con grano de caucho reciclado es óptima en suelos finos con subrasantes menores al 8%, en una carpeta asfáltica con espesores entre el 7.5 y 10 cm.

En el caso de los tipos de suelo se puede afirmar que las estructuras de pavimentos con subrasantes blandas (CBR inferior al 5%), originan grandes consumos los cuales implican la necesidad de un tratamiento o mejoramiento de suelo.

Al analizar las velocidades de operación vehicular teniendo como referencia una velocidad de diseño de 80 km/h se logró demostrar que si los vehículos transitan a una velocidad de 50 km/h estos generan mayores daños por fatiga, caso contrario de una velocidad de 110 km/h el cual disminuye el promedio de daño en la carpeta asfáltica.

Se obtuvo un método simplificado de análisis estructural pavimentos flexibles basado en la obtención de la deformación a tracción en la fibra inferior de la capa de rodadura, a partir del CBR de la subrasante y el espesor de capa de rodadura para cada mezcla asfáltica estudiada. Dicho valor, está limitado a estructuras de pavimentos con subrasantes que presente un CBR entre el 2 y 10%, capas granulares de base y subbase con 20 y 30 cm de espesor respectivamente, capas asfálticas con espesores comprendidos entre 7.5 y 15 cm y la influencia de un eje estándar de rueda doble de 8.2 toneladas.

4 Referencias Bibliográficas

- [1] Instituto Nacional de Vías, Estado de la red vial criterio técnico primer semestre 2018, 2018. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/informacion-institucional/7688-estado-de-la-red-vial-criterio-tecnico-primer-semester-2018>.
- [2] G.R. Morris, True cost effectiveness of bitumen-rubber paving systems, *Use Waste Mater. Hot-Mix Asph.* In H. (1993) 293–302. <https://doi.org/10.1520/stp1193-eb>.
- [3] G.B. Way, Asphalt-Rubber 45 Years of Progress, *Asph. Rubber* 2012. (2012) 1–13.
- [4] A.F. De Almeida Júnior, R.A. Battistelle, B.S. Bezerra, R. De Castro, Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil, *J. Clean. Prod.* 33 (2012) 236–238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.039>.
- [5] J.W. Jang, T.S. Yoo, J.H. Oh, I. Iwasaki, Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea, *Resour. Conserv. Recycl.* 22 (1998) 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00041-4).
- [6] V. Torretta, E.C. Rada, M. Ragazzi, E. Trulli, I.A. Istrate, L.I. Cioca, Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review, *Waste Manag.* 45 (2015) 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>.
- [7] C. Wu, J.B. Sousa, A. Li, Z. Zhao, ACTIVATED MINERALS AS BINDER STABILIZERS IN MIDDLE COURSE 's ASPHALT CONCRETE PAVING MIXTURES, 91 Anu. Meet. Transp. Res. Board. (2012).
- [8] J.B. Sousa, E.A. Vorobiev, I. Ishai, G. Svecchinsky, Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes, (2012).
- [9] I. Sousa, J.B., Vorobiev, E.A., Rowe, G.M., Ishai, Reacted and activated rubber - an elastomeric asphalt extender, 2012 (2012).
- [10] J.L. Feiteira Dias, L.G. Picado-Santos, S.D. Capitão, Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.110>.
- [11] E.A. Hunt, Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon. Final Report SPR 355, (2002).
- [12] F. Hernandez-Olivares, B. Witoszek-Schultz, M. Alonso-Fernandez, C. Benito-Moro, Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process, *Int. J. Pavement Eng.* 10 (2009) 277–288. <https://doi.org/10.1080/10298430802169416>.
- [13] F. Moreno, M.C. Rubio, M.J. Martínez-Echevarria, Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2323–2334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.029>.
- [14] F. Moreno, M. Sol, J. Martín, M. Pérez, M.C. Rubio, The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation, *Mater. Des.* 47 (2013) 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.022>.
- [15] J. Wang, J. Yuan, K.W. Kim, F. Xiao, Chemical, thermal and rheological characteristics of composite polymerized asphalts, *Fuel.* 227 (2018) 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.100>.
- [16] I.M. Khan, S. Kabir, M.A. Alhussain, F.F. Almansoor, Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction, *Procedia Eng.* 145 (2016) 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.196>.
- [17] M.A. Dalhat, H.I. Al-Abdul Wahhab, Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia, *Int. J. Pavement Eng.* 18 (2015) 349–357. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150>.
- [18] P.-H. Yeh, Y.-H. Nien, W.-C. Chen, W.-T. Liu, Evaluation of thermal and viscoelastic properties of asphalt binders by compounding with polymer modifiers, *Polym. Compos.* 31 (2010) 1738–1744. <https://doi.org/10.1002/pc.20964>.
- [19] A. Lozano, F. Molina-Gomez, J.C. Ruge-Cárdenas, L.A. Moreno, J.G. Bastidas, Asphalts and modified dense bituminous mixtures with rubber of military boots, *DYNA.* 87 (2020) 120–128. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78135>.
- [20] L. Zhang, C. Xing, F. Gao, T. shuai Li, Y. qiu Tan, Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt, *Constr. Build. Mater.* 127 (2016) 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.010>.
- [21] S. Wang, D. Cheng, F. Xiao, Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt, *Constr. Build. Mater.* 131 (2017) 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.077>.
- [22] H.A. Rondón-Quintana, J.G. Bastidas-Martínez, C.-P. S.B., Influence of Mixing Time and Temperature in Hot Mix Asphalt Stiffness During Asphalt Modification, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 10 (2019) 215–228. http://www.academia.edu/download/61713071/IJCIET_10_12_02120200107-108549-20h5z9.pdf.
- [23] C.-P. S.B., H.A. Rondón-Quintana, J.G. Bastidas-Martínez, AGING OF ASPHALT BINDERS AND ASPHALT MIXTURES . SUMMARY PART I: EFFECT ON PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 10 (2019) 259–273.
- [24] C.-P. S.B., H.A. Rondón-Quintana, J.G. Bastidas-Martínez, AGING OF ASPHALT BINDERS AND ASPHALT MIXTURES . SUMMARY PART II: AGING SIMULATION AND AGING REDUCTION TECHNIQUES, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 10

- (2019) 274–287.
- [25] F.F. Camargo, L. Bernucci, Case history study: field monitoring and performance prediction of a field-blended rubber asphalt mixture in Brazil, *Int. J. Pavement Eng.* 20 (2017) 172–182. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1279484>.
 - [26] T.W. Hsu, S.C. Chen, K.N. Hung, Performance Evaluation of Asphalt Rubber in Porous Asphalt-Concrete Mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (2011) 342–349. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000181).
 - [27] C. Wang, L. Zhao, W. Cao, D. Cao, B. Tian, Development of paving performance index system for selection of modified asphalt binder, *Constr. Build. Mater.* 153 (2017) 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.151>.
 - [28] M.H. Muller, J., Shelf-Life and Performance properties of bitume rubber, *Asph. Rubber.* 1 (2012) 429–441.
 - [29] M. Msallam, I. Asi, Improvement of local asphalt concrete binders using crumb rubber, *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (2018) 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002238](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002238).
 - [30] L.N. Lopes, M.M. de Farias, L.G.R. de Mello, Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber–RAR, *Road Mater. Pavement Des.* 0629 (2020). <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1710553>.
 - [31] J.G. Bastidas-Martínez, H.A. Rondón-Quintana, *Caracterización de mezclas de concreto asfáltico* (in Spanish), Editorial, Bogotá, 2020.
 - [32] INVIAS, Instituto Nacional de Vías - Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico) Artículo 450-13, 2013.

Y.A. Avendaño-Contreras, received the BSc. Eng in Civil Engineering in 2018, from the Universidad Católica, Colombia, MSc. in Pavements of Engineering in 2020, from the Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C.
ORCID: 0000-0002-6818-0322.

J.C. Ruge, received the BSc. Eng in Civil Engineering in 2002, from the Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), Colombia, MSc. in Civil Engineering with emphasis on Geotechnics in 2005, from the Universidad de Los Andes, Colombia, and the PhD in Geotechnics in 2014 from the University of Brasília (UnB), Brazil. Formerly postdoctoral researcher fellow in the Civil and Agricultural Department, at the Universidad Nacional de Colombia. He is currently assistant professor of the Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia.
ORCID: 0000-0002-9100-6058.